Die Elemente der neuen Theorie der Tonempfindungen.

INAUGURAL-DISSERTATION,

ZUR

ERLANGUNG DER PHILOSOPHISCHEN DOCTORWÜRDE,

VORGELEGT DER

PHILOSOPHISCHEN FACULTÄT

DER

UNIVERSITÄT ZU ROSTOCK

VON

Otto Schneider

aus Crossen a. O.

1870.

Druck von H. Arnold in Crossen.

Werden die Gehörsnerven auf irgend eine Weise gereizt, so wird etwas gehört. Das Gehörte nennen wir Schall oder Tonempfindung. Die Reizung der Gehörsnerven beim Hören eines objectiven Schalles geschieht dadurch, dass die Luft im Ohre in Bewegung gesetzt wird, beim Hören eines subjectiven Schalles im Ohrenklingen, Ohrenbrausen u. s. w. durch Reizungen der Gehörsnerven durch innere Vorgänge. Diese inneren Vorgänge, die uns hier nicht weiter beschäftigen sollen, können ihre Ursache in Blutandrang nach dem Kopfe, in Störung der von du Bois-Reymond entdeckten electrischen Ströme, welche alle Theile des Nervensystems und alle Muskeln der Thiere in ziemlicher Stärke durchströmen, in krankhaften Zuständen der Organe des Ohres ihren Grund haben. Ist die Bewegung der Luft im Ohre beim Hören eines objectiven Schalles regelmässig in sehr kurzen Zeiten hin- und hergehend, oder besser, schwingt die Luft im Ohre periodisch mit kurzer Schwingungsdauer, so nennen wir die Tonempfindung Klang; sind diese beiden Bedingungen nicht erfüllt, so heist die Tonempfindung Geräusch. Die älteren Akustiker haben beim Klange — sie nannten ihn auch Ton, ein Wort, das wir, wie sich zugleich zeigen wird, durchaus in ganz anderer Bedeutung anwenden werden — Stärke, Tonhöhe und Klangfarbe unterschieden, aber sie haben nur ganz richtig die Erklärung des Wesens der Stärke gegeben.

Was die Tonhöhe anbetrifft, so sagte die alte Schule, dass ein Klang um so höher sei, je grösser die Zahl seiner Schwingungen in der Sekunde ist; sie gab hier auch die Verhältnisse der Schwingungszahlen der Octave, Quinte, Quarte u. s. w. richtig an, aber sie hatte keine Vorstellung davon, dass einem Klange — wie wir später sehen werden — für gewöhnlich mehrere Tonhöhen zukommen müssen. Einzelne gründliche Akustiker allerdings, wie z. B. Rameau um 1725, ahnten wohl die Unrichtigkeit der alten Theorie, aber ihre Ansichten blieben wegen der Schwierigkeit, die nöthigen Beobachtungen mit unbewaffnetem Ohre d. h. ohne Hülfsmittel anzustellen, ganz unbeachtet.

Wir hatten einen Klang dahin definirt, dass er der Eindruck einer schnellen periodischen Luftbewegung auf unser Ohr sei; wie aber die Bewegung innerhalb einer Periode sei, hatten wir nicht angegeben. Wenn wir beliebige periodische Bewegungen in pendelartige zerlegen, so zeigt die mathematische Theorie zwei Möglichkeiten: entweder ist sie rein pendelartig, oder sie ist aus einer Summe von rein pendelartigen Schwingungen, die in jedem vorliegenden Falle auf eine Weise fest bestimmt sind, zusammengesetzt. Helmholtz gebührt nun der grosse Ruhm, zuerst evident gezeigt zu haben, dass dieser mathematischen Theorie etwas Reelles beim Hören eines Klanges entspricht. Er zeigt, dass, wenn die den Klang hervorrufende periodische Bewegung rein pendelartig ist, der Klang eine bestimmte Tonhöhe hat, dass aber, wenn diese Bewegung nicht rein pendelartig ist, im Klange mehrere Tonhöhen enthalten sind. Nennt man jetzt den Klang, der einer rein pendelartigen Bewegung entspricht, im besonderen Ton, so

können wir beim Angeben eines musikalischen Instruments einen Ton mit seiner Tonhöhe oder einen Klang d. h. Töne mit ihren Tonhöhen bekommen. Ein Beispiel möge dies erläutern.

Schlage ich auf dem Klavier eine Taste an, so sind zwei Fälle möglich: das Gehörte kann einmal ein Ton mit seiner Tonhöhe z. B. c oder zweitens ein Klang mit seinen Tönen und mit seinen Tonhöhen z. B. c c' g' c'' e'' g'' b'' c''' etc. sein. Helmholtz hat nun gefunden, dass die erste Möglichkeit fast nirgends stattfindet, sondern fast immer nur die zweite; er hat ferner gefunden, dass auch die Reihe der Töne im Klange bei jedem Tonwerkzeuge eine ganz bestimmte ist; dass nemlich, wenn die Reihe vollständig ist, beim Klange ein tiefster Ton, den er Grundton nennt, und Töne gehört werden, die 2, 3, 4, . . . mal so viel Schwingungen als der Grundton in der Sekunde machen. Die Töne heissen Obertöne, und zwar heisst der Ton, der 2, 3, 4 . . . mal so viel Schwingungen macht, der 2te, 3te, 4te, . . . Oberton.

Was die Stärke der einzelnen Theiltöne eines Klanges betrifft, so ist zu bemerken, dass der Grundton gewöhnlich der stärkste ist, und dass die Stärke der Obertöne gewöhnlich mit der Grösse ihrer Ordnungszahl abnimmt, dass es aber auch Klänge giebt, in denen einzelne Obertöne ausfallen, ferner solche, in denen der Grundton und die ersten Obertöne bedeutend zurücktreten, ja sogar solche, in denen die ersten Obertöne wegen der Langsamkeit der ihnen zukommenden Schwingungen noch gar nicht als Töne, sondern noch als Bewegung, wahrgenommen werden.

Von allen Theiltönen eines Klanges kannten die älteren Akustiker gewöhnlich nur den, der am meisten in die Ohren fällt, derselbe soll auch jetzt noch die Tonhöhe eines ganzen Klanges bestimmen. Die Tonhöhe eines Klanges bestimmt also das Ohr; besteht z. B. ein Klang aus den Tönen c c′ g′ c″ e″ g″ b″ c‴ . . . so braucht die Tonhöhe nicht nothwendig c zu sein, sondern sie kann auch eben so gut z. B. g′ sein; wenn nemlich nicht c, sondern g′ am meisten in die Ohren fällt. Wenn ein Klang aus mehreren Tönen besteht, so kann, wie wir später sehen werden, jeder Ton für sich gehört werden.

Das Dritte, was an einem Klange zu unterscheiden war, war die Klangfarbe. Gaben wir schon an, dass die älteren Akustiker von der Tonhöhe eine unrichtige Vorstellung hatten, so müssen wir hier sagen, dass sie von der Klangfarbe so gut wie gar keine Vorstellung hatten. Sie wussten, dass die Klangfarbe, da sie nicht von der Breite der Schwingung — Stärke — noch von der Länge der Schwingungsdauer — Tonhöhe — abhängen konnte, in irgend welchem Zusammenhange mit der Schwingungsform innerhalb der Periode stehen musste; aber wie, das ahnten sie nicht einmal. Wir haben schon gesehen, dass auch die Obertöne von der Schwingungsweise innerhalb der Periode abhängen. Wir werden deshalb vermuthen, dass zwischen den Obertönen und der Klangfarbe ein inniger Zusammenhang stattfindet. Diese höchst interessante Sache wird uns später beschäftigen.

Als Beweis dafür, dass ein Klang aus Tönen besteht, hatten wir angegeben, dass man sie hören könne. Wenn dies wahr ist, woher kommt es aber, dass die unendliche

Menge der musiktreibenden Menschen von den Zeiten Jubals bis zur Gegenwart sie nicht gehört hat? Dies würde für uns ein mehr als hinreichender Grund sein, die wirkliche Existenz der Obertöne äusserst zu bezweifeln, wenn nicht der Entdecker der neuen Theorie, Helmholtz, Methoden angegeben hätte, wie man ihr Sein auch dem beweisen kann, dessen Ohr musikalisch ganz ungebildet ist.

Die ältere Akustik lehrt richtig, dass die Schwingungen eines Körpers beim Tönen nicht nur der umgebenden Luft mitgetheilt werden, sondern dass durch die Schwingungen der Luft selbst andere in ihr befindliche Körper in schwingende Bewegung versetzt d. h. zum Tönen gebracht werden können. Sie lehrt, dass das Mittönen des zweiten Klanges nur dann stattfindet, wenn er für sich allein oder durch Theilung in aliquote Theile den Ton des ersten Körpers giebt.

Die Erscheinung des Mittones wird uns sogleich Gelegenheit geben, einen Apparat zu construiren, durch den die Obertöne für einen vom Ohre unabhängigen Sinn, nemlich für unsere Augen, vernehmbar werden. Wir brauchen dazu eine elastische ausgespannte Membran. Wie wir aber von den Chladnischen Klangfiguren her wissen, können elastische Körper gewöhnlich mehrere Schwingungen ausführen. Jeder besonderen Schwingungsfigur entspricht ein besonderer Ton. Wir wollen diese verschiedenen Töne des elastischen Körpers seine Eigentöne nennen. Diese Eigentöne sind bei den ausgespannten Membranen in der Regel zu einander sehr disharmonisch; wodurch ihre Unterscheidung durch das Ohr sehr erleichtert wird.

Sprengen wir jetzt den Boden einer gewöhnlichen Glasflasche weg, spannen an seiner Stelle eine nasse Schweinsblase recht regelmässig auf und lassen sie trocknen, so haben wir in der elastischen Membran einen Apparat, der wegen seiner Leichtigkeit durch die periodisch wirkende Kraft der Luftschwingungen leicht in Mitschwingung versetzt werden kann. Stellt man diese Flasche in einen Ring, so dass der membranöse Boden horizontal ist, bestreut ihn gleichmässig mit feinem Quarzsande, so tanzt der Sand, so oft im Zimmer ein Eigenton des Apparates angegeben wird, hurtig von den in Schwingung gerathenen Theilen der Membran und sammelt sich wie bei den Chladnischen Klangfiguren in den Knotenlinien.

Will man sich Flaschen von bestimmten Grundtönen machen, so hat man zu beachten, dass derselbe um so höher wird, je kleiner die Flasche und je grösser die Oeffnung am Halse gewählt wird, und je straffer die Membran gespannt ist.

Jetzt mögen wir eine bestimmte Flasche, deren Grundton $c' = 264$ ist, mit Sand bestreuen. Geben wir auf irgend eine Weise alle möglichen Noten an, so finden wir, dass der Sand nur bei $c' = 264$; $c = 264 : 2$; $F = 264 : 3$; $C = 264 : 4$ etc. im allgemeinen geordnet wird und sonst nicht.

Was folgt nun evident aus diesem Versuche? Im Klange C, F, c ist als Oberton c enthalten. Würde man sich Flaschen verfertigen, deren Grundtöne z. B. 66. 1; 66. 2; 66. 3; 66. 4; ... Schwingungen in der Sekunde macht, so würden allesammt beim Anschlagen von $C = 66$ den Sand nach dem Rande werfen; so weit natürlich immer die

Empfindlichkeit des Instrumentes reicht. Hiermit haben wir den klarsten Beweis, dass im Klange C alle diese Töne enthalten sind, und zwar als so vielster Oberton als der Factor von 66 angiebt. Die objective Existenz der Obertöne ist hiermit klar und deutlich bewiesen; denn was früher ein aufmerksamer und befähigter Beobachter nur hören konnte, das erscheint jetzt dem Auge jedes Sehenden. Die Empfindlichkeit des Werkzeuges kann man noch bedeutend vermehren — wobei allerdings dann das Zeugniss des Auges wegfällt — wenn man an Stelle der ausgespannten Membran das Trommelfell des Ohres selbst setzt. Zu dem Zwecke nimmt man eine Hohlkugel oder Röhre, in denen sich zwei am besten gegenüber liegende Oeffnungen befinden. Die grössere der Oeffnungen hat scharf abgeschnittene Ränder, die kleinere ist trichterförmig geformt; die letztere umgiebt man mit flüssigem Siegellack und lässt ihn so weit erkalten, bis man ihn ohne Schaden in den äusseren Gehörgang des Ohres zum dichten Verschluss drücken kann. Wir wollen diesen Apparat mit Helmholtz Resonator nennen. Die Luftmasse in ihm in Verbindung mit der im Gehörgange bis zum Trommelfell bilden ein elastisches System, welches bestimmte Eigentöne hat; da aber der Grundton unter ihnen bei weitem der allertiefste ist, so ist an eine Verwechselung der Töne gar nicht zu denken. Steckt man einen gehörig eingerichteten Resonator in das eine Ohr, verschliesst das andere durch einen Siegellackpfropfen, so hört man von einer in der Umgebung bestehenden Klangmasse so lange fast nichts, bis in ihr eine pendelartige Schwingung vorkommt, die dem Grundton des Resonators entspricht; alsdann aber gellt und posaunt

der betreffende Ton kräftig in das Ohr. Dieser Helmholtz'sche Apparat ist die Grundstütze der ganzen neuen Theorie der Tonempfindung. Wie der Entdecker auf ihn gekommen, habe ich in seinen Werken nicht finden können, vielleicht hat ihm das Treiben der Kinder, welche Muscheln, Pennale, Tintenfässer u. s. w. an das Ohr halten, um sich am vermeintlichen Brausen der Meereswogen zu ergötzen, die erste Idee zu dieser in der Theorie der Töne bahnbrechenden Erfindung gegeben. Wenigstens scheint mir die Tonempfindung, die man hat, wenn man ein halb geschlossenes Gefäss mit seiner Oeffnung an das Ohr bringt, dadurch seine richtige Erklärung zu finden, dass das Gefäss aus den uns umgebenden Geräuschen — sie sind immer vorhanden, auch wenn wir ohne Hilfsmittel sie nicht hören, weil unsere Sinne constante Empfindungen nicht wahrzunehmen vermögen — immer seine Eigentöne verstärkt.

Wiewohl wir durch das Mitschwingen der Membranen an der Resonanzflasche und durch das des Trommelfelles des Ohres die wahrhafte Existenz der Obertöne festgestellt haben, so bleibt doch die sonderbare Thatsache übrig, dass keiner der früheren Musiker die Obertöne gehört hat. Helmholtz giebt darum mehrere Methoden an, die Obertöne auch musikalisch ungeübten Ohren hörbar zu machen. Wir wollen zuerst eine Methode, bei der man keinen Resonator nöthig hat, wiedergeben.

Bekanntlich ist es am schwersten, die Octaven aus einem Accorde herauszuhören, darum wird man auch beim Klange seine Aufmerksamkeit nicht auf die Octaven des Grundtones oder die eines Obertones, also nicht auf den

2ten, 4ten, 6ten . . . Oberton, sondern auf die übrigen richten. Da die Obertöne mit der Höhe abzunehmen pflegen, so wird der dritte, die Quinte der höheren Octave, im allgemeinen am leichtesten zu hören sein. Will man nun den dritten Oberton an einer Klaviersaite hören, so sucht man sich erst von einer bestimmten Saite den dritten Theil ihrer Länge. Am leichtesten geschieht dies, indem man zuerst ohngefähr den Ort nach dem Augenmaass bestimmt, ihn mit dem Finger berührt und die bezügliche Saite anschlägt; ertönt jetzt der dritte Oberton nicht rein und voll als Flageoletton, so schiebt man mit dem Finger so lange hin und her, bis es geschieht. Nun berührt man die bezügliche Stelle mit einem kleinen Malerpinsel, so wird zuerst der gesuchte Oberton noch allein hörbar bleiben; drückt man dann allmählich den Pinsel weniger fest, so hört man zugleich schwach den Grundton mittönen, dann stärker und stärker bis allmählich nach vollständiger Entfernung des Pinsels Grundton und dritter Oberton in voller Klarheit neben einander ertönen. Nachdem man sich geübt hat, den dritten Oberton bei verschiedenen Saiten zu hören, geht man zu den übrigen ungeradzahligen und dann zu den geradzahligen Obertönen. Auf diese Weise also kann man Obertöne wahrnehmen lernen.

Bei einer anderen äusserst practischen Art, dies zu thun, braucht man die Resonatoren. Man verstärkt sich nämlich den zu hörenden Oberton einer beliebigen Klangmasse durch den betreffenden Resonator und prägt sich den Ton fest ein. Durch eine mehr oder weniger weite Entfernung des Resonators aus dem Gehörgange kann man sodann eine beliebige Abstufung in der Verstärkung des Obertones

hervorbringen, so dass man ihn allmählich auch ohne Verstärkung deutlich hört. Auf diese Weise lernt man auch ohne äussere Hilfe zuletzt in jedem Klange die Obertöne bei concentrirter Aufmerksamkeit hören.

Wenn man sich geübt hat, die Obertöne zu hören und ihre grosse Zahl und Stärke betrachtet, wird man gewiss beim ersten Nachdenken nicht begreifen können, warum die vielen Tausende der ausgezeichnetsten Musiker seit den undenklichen Zeiten der ägyptischen Cultur die starken Obertöne nicht gehört haben; zumal wenn man bedenkt, wie fein Aegypter und Griechen auf anderen Gebieten beobachtet haben. Man sollte doch meinen, es wäre unendlich viel leichter, so genau aufzupassen, dass man im Klange der Lyra die Obertöne hörte, als z. B. ohne Hilfsmittel eine Sonnenfinsterniss zu berechnen. Das Phänomen erklärt sich aber ziemlich leicht, wenn wir beachten, wie der Mensch allmählich hören lernt.

Erschallt dem Kinde zum ersten Male der Klang der Mutterstimme, so reizt, wie später näher entwickelt werden wird, jeder Ton des Klanges seinen bezüglichen Gehörsnerven im Verhältniss zu seiner Stärke. Was soll nun das Kind mit dem Wirrwarr der Töne, mit den 16 und vielleicht noch mehr verschiedenen Stimmen, die dasselbe in verschiedener Tonhöhe sprechen, anfangen, selbst wenn die Eindrücke schon so stark und das Fassungsvermögen schon so ausgebildet wäre, dass es einen einzelnen Ton auffassen könnte? Es ist klar, dass das Kind so lange einen überwältigenden Eindruck erhalten wird, bis es ihm gelingt, die 16 stets zusammen auftretenden Töne als ein Ganzes zu betrachten; jetzt erst kann es den Klang der

Stimme verstehen lernen. Aehnlich wie mit dem Auffassen der menschlichen Stimme ist es mit dem Auffassen der übrigen Klänge und Geräusche beschaffen, nur durch das sofortige Zusammenfassen von zugleich auftretenden Tönen zu einem Ganzen wird dem Kinde die Möglichkeit des Verstehens und Behaltens gegeben Wie kann nun später der Mensch, wenn er zu betrachten und zu überlegen anfängt, zu dem Gedanken kommen, dass das kein Ganzes ist, was er von der frühesten Jugend auf als ein Ganzes betrachtet und nur durch diese Zusammenfassung verstanden hat? Und bekäme er diesen Gedanken, wie soll er die Zerlegung anfangen? Der blosse Wille, den Klang in seine Elemente zu zerlegen, reicht wahrlich nicht aus; ebensowenig wie das Auge durch den Willen das Weiss des Sonnenlichtes in die Regenbogenfarben zerlegen kann. Nach diesen Ueberlegungen muss man sich in der That umgekehrt wundern, dass Menschen, wie Rameau, soviel Beobachtungstalent besitzen konnten, dass sie die Töne im Klange ohne alle Hilfsmittel bemerkt haben. Es war jedenfalls nur dadurch möglich, dass bei vielen Klängen die Obertöne fast unendlich wenig langsamer an Stärke abnehmen als der Grundton Wir werden uns jetzt gewiss nicht mehr wundern, dass, als Rameau die Obertöne der menschlichen Stimme beobachtet hatte, niemand ihm glaubte; denn niemand konnte sie hören; und hätte Helmholtz seine neuen Entdeckungen über Tonempfindungen veröffentlicht, ohne die Methoden anzugeben, wie man die Obertöne hören kann, seine wundervoll einfache Erklärung der Klangfarbe, der Harmonie u. s. w., würde uns vielleicht die Theorie der Obertöne glaubhaft machen, aber als wissenschaftlich über

allen Zweifel erhaben würde man sie durchaus in keiner Weise betrachten können; wir hätten eben nur eine geistreiche Hypothese.

Nachdem wir im Früheren die wirkliche Existenz der Obertöne bewiesen haben, gelangen wir jetzt zu den hauptsächlichsten Erscheinungen, die durch sie ihre einfache Erklärung finden.

Wir hatten schon früher bemerkt, dass die ältere Akustik zu dem Resultat gekommen war, dass die Klangfarbe in irgend einem Zusammenhange mit der Form der Luftschwingungen innerhalb der einzelnen Perioden stehen müsse. Wir wollen jetzt zu zeigen suchen, wie dieser Zusammenhang beschaffen ist. Wir müssen aber zuerst klar darstellen, was wir unter Klangfarbe verstehen wollen. Wir verstehen darunter nicht das ganze Characteristische des Klanges, das nicht von der Stärke und Tonhöhe abhängt, sondern nur gewisse Eigenthümlichkeiten des ruhig bestehenden Klanges. Die Art und Weise des An- und Ausklingens und die den Klang selbst begleitenden schwachen Geräusche verstehen wir unter Klangfarbe nicht. Es bildet das Vierte, was man nach Stärke, Höhe und Klangfarbe bei jedem Klange zu beobachten hat. Dasselbe ist durchaus nicht unwichtig, wie man schon daraus sieht, dass das verschiedene An- und Ausklingen der menschlichen Stimme durch die verschiedenen Consonanten bezeichnet wird. Fehlt uns diese vierte Eigenthümlichkeit, wie es sehr leicht möglich ist, wenn wir aus weiter Ferne einen Klang hören, so können wir, wie die Erfahrung lehrt, sehr häufig nicht unterscheiden, welchem Instrumente der Klang angehört. Allein diese vierte Eigenthümlichkeit wollen wir

hier übergehen, weil, was darüber gesagt werden kann, der älteren Akustik recht wohl bekannt war. Wir behandeln also gleich die eigentliche Klangfarbe, d. h. so weit der Klang von dem vollkommen regelmässigen Theile der periodischen Luftbewegung abhängt. Da die Untersuchung der Klangfarbe bei allen Instrumenten dem Principe nach dieselbe ist, wollen wir beispielsweise unsere Aufmerksamkeit auf die Klangfarbe der Saiten richten, die in Folge eines Schlages erklingen. Wir können hierbei sehr leicht beobachten, dass die Klangfarbe von dreierlei abhängt, einmal von der Stelle, wo die Saite geschlagen wird, zweitens von der Art des Anschlages und drittens von der Beschaffenheit der Saite. Da von der Stelle des Anschlages die Klangfarbe einer Saite abhängig ist, und da wir einen Zusammenhang von der Klangfarbe und den Obertönen vermuthet haben, so wollen wir den Klang in Bezug auf die Obertöne bei verschiedenen Anschlagestellen mit den Resonatoren untersuchen. Wir finden, dass die Zahl und Stärke der Obertöne mit der Klangfarbe verschieden ist; wir bemerken, dass die Obertöne ganz fehlen, bei denen die Saite an der angeschlagenen Stelle einen Schwingungsknoten haben müsste, und dass die Obertöne am stärksten entwickelt sind, bei denen an der Anschlagstelle der Saite ein Maximum der Ausbiegung zukommt. Leicht ersichtlich ist, was uns der Resonator berichten wird, wenn wir die Saite zwischen diesen beiden Stellen anschlagen. Je näher die Anschlagestelle an das Maximum der Ausbiegung der Saite für einen bestimmten Oberton rückt, desto kräftiger ist er vorhanden. Berücksichtigen wir, dass an der Stelle, wo der Schwingungsknoten und wo das

Maximum der Ausbiegung des mten Obertones ist, auch der 2mte, 3mte .... ihre Schwingungsknoten resp. die Maxima ihrer Ausbiegung haben, dass also mit dem mten Oberton zugleich der 2mte, 3mte .... ausfällt resp. verstärkt wird, so werden wir es sehr erklärlich finden, dass die Klangfarbe des Klanges einer Saite mit den verschiedenen Anschlagstellen bedeutend verschieden ist. Schlagen wir z. B. genau in der Mitte der Saite an, so fallen alle geradzahligen Obertöne weg, der 3te Oberton erreicht das Maximum seiner Stärke, und alle andern ungeraden Obertöne sind verhältnissmässig stark vorhanden Die Saite klingt darum hohl und näselnd. Lässt man durch Anschlagen in $\frac{1}{3}$ der Länge den 3ten, 6ten, 9ten ... Oberton wegfallen, so klingt die Saite schon weniger hohl und näselnd. Schlägt man die Saite sehr nahe am Ende an, so treten die höheren Obertöne stärker hervor, und der Grundton und die ersten Obertöne treten an Stärke zurück; die Saite klingt leerer und klimpernder als früher. Es genüge dies über die Abhängigkeit der Klangfarbe von der Stelle des Anschlages.

Wenn wir jetzt zweitens die Abhängigkeit der Klangfarbe von der Art und Weise des Anschlages untersuchen, müssen wir natürlich immer dieselbe Anschlagstelle voraussetzen. Bei diesen Untersuchungen zeigt uns der Resonator, dass die höheren Obertöne um so stärker entwickelt sind, eine je grössere Discontinuität durch die Anschlagweise in die Form der Saite gebracht wird. Natürlich je unregelmässiger die Saite geformt ist, desto grösser wird die Anzahl und desto entwickelter werden die Ausbiegungen der rein pendelartigen Schwingungen werden müssen, durch

deren Summe die Form der Saite wieder hergestellt wird. Wird die Saite zuerst mit dem weichen Finger zur Seite gebogen, so ist der Klang der Saite weich, wohlklingend aber nicht hell. Der Resonator belehrt uns, dass der Grundton in grosser Stärke entwickelt und die Reihe der Obertöne im allgemeinen vollständig vorhanden ist, dass diese aber sehr schnell an Stärke abnehmen. Achten wir auf die Form der Saite unmittelbar nach dem Anschlage, so sehen wir, dass wir nur eine sehr geringe Discontinuität haben; die Form der Saite ist, so zu sagen, ein Winkel, dessen Spitze abgerundet ist. Bringen wir zweitens die Saite mit einem scharfen Stift aus der Gleichgewichtslage und achten wir gleich auf die Form der Saite, so finden wir eine grössere Discontinuität als früher; die Abrundung ist weggefallen. Wir werden daher sogleich vermuthen, dass die Obertöne an Zahl und Stärke gegen früher zugenommen haben werden. Der Resonator bestätigt dies vollkommen und giebt zugleich an, dass der Grundton etwas schwächer geworden ist. Der Klang der Saite ist nicht so weich wie früher, er ist leerer, heller und klimpernder. Schlagen wir zuletzt einen Punkt der Saite mit einem scharfen Metallhammer, also dass die ganze Saite noch in Ruhe ist, während ein sehr kleines Stückchen schon sehr weit aus der Gleichgewichtslage gebracht ist, so haben wir die schärfste Form der Discontinuität, die überhaupt möglich ist. Beurtheilen wir diesen Fall nach den beiden früheren, so sollte im allgemeinen in der Reihe der Obertöne kein Ton fehlen, der Grundton und die ersten Obertöne sollten aber nur schwach und die höheren Obertöne in bedeutender Stärke vorhanden sein. Der Klang der

Saite müsste demnach sehr leer aber sehr hell und klimpernd also durchaus nicht so wohlklingend wie früher sein. Wenn wir jetzt mit Resonator und Ohr den Klang untersuchen, so finden wir, dass unsere Schlüsse in jeder Beziehung richtig sind.

Es ist sehr leicht zu sehen, wie die Klangfarbe und darum die Zahl und Stärke der Obertöne sein wird, wenn wir eine Anschlagsweise wählen, die zwischen den drei behandelten liegt.

Das Dritte, wovon der Klang der Saite abhängt, war die Beschaffenheit der Saite. Es ist natürlich, dass feinere Saiten noch in kürzeren Abtheilungen schwingen können als dickere von demselben Material; es werden also die dünneren verhältnissmässig eine grössere Menge hoher Obertöne und darum einen klimpernderen Klang als die dickeren haben. Schwere Metallsaiten ferner brauchen längere Zeit, ehe sie in Ruhe kommen, als leichtere Darmsaiten, daher werden in den Darmsaiten die höheren Obertöne schneller verschwinden, und ihr Klang wird darum weniger klimpernd sein.

Aus dem Gesagten wird unmittelbar klar sein, wie äusserst mannigfach die Zahl und Stärke der Obertöne und demnach die Klangfarbe der geschlagenen resp. gerissenen Saiten geändert werden kann; daher kommt auch die grosse Zahl der hierher gehörigen Instrumente: Fortepiano, Harfe, Guitarre, Cither, Monochord und an den Streichinstrumenten das Pizzicato.

Bei den bisher besprochenen Erregungsweisen der Saiten haben wir den Vortheil, dass wir die Ergebnisse der reinen Physik durch rein mathematische Rechnung

prüfen und, wo es nöthig ist, vervollständigen können. Physik und Mathematik, Praxis und Theorie, stimmen hier vollständig überein, nur sind natürlich die Resultate der Mathematik weitergehender als die der Physik; die Mathematik erzählt und berichtet uns noch ganz genau von Tönen, die wir mit unsern schwachen Sinnen und unvollkommenen Instrumenten nicht mehr klar und deutlich vernehmen können, die aber doch für den Totaleindruck nicht unwesentlich sind. Nachdem die Physik der Mathematik die Elemente und Anhaltpunkte zur Rechnung gegeben, triumphirt die letztere weit über alle Erfahrungswissenschaft.

Untersuchen wir auf dieselbe Weise die übrigen musikalischen Intrumente, so finden wir, dass bei einem Theile die Reihe der Obertöne im allgemeinen vollständig ist (Streichinstrumente, ungedackte Lippenpfeifen, Blechinstrumente, menschliche Stimme, Zungenpfeifen), dass bei einem anderen Theile alle geraden Obertöne ausfallen (gedackte Lippenpfeifen, Clarinette), ferner dass bei einem dritten Theile bei sehr starkem Grundtone und sehr schwachen harmonischen Obertönen noch mehr oder weniger starke unharmonische Obertöne vorhanden sind (Stimmgabel, Glas- und Holzstab-Harmonika, elastische Scheiben, Pauke, Trommel.)

Der Eindruck, den die Instrumente auf unsere Empfindung machen, hängt, wie wir schon bei den gerissenen Saiten beschrieben haben, durchaus von der Anwesenheit und Stärke der Obertöne ab. Sind unharmonische Obertöne oder sehr hohe harmonische in bedeutender Stärke wie z. B. bei den Blechinstrumenten vorhanden, so haben die betreffenden Instrumente einen schnarrenden, näselnden,

unharmonischen Klang; sie können darum für sich in der rein künstlerischen Musik nicht gebraucht werden, sie finden aber mit Recht wegen ihres durchdringenden Klanges ihre Anwendung in der Militärmusik, bei der der Hauptnachdruck auf die Kräftigkeit gelegt werden muss.

Unter allen Instrumenten finden wir nur ein einziges ohne Oberton; bei den weiten gedackten Pfeifen nemlich haben wir eine rein pendelartige Schwingung, einen Ton. Die Klangfarbe dieser Pfeifen ist hohl, dumpf, unkräftig aber auch äusserst weich Einen reinen Ton kann man auch leicht dadurch erhalten, dass man eine angeschlagene Stimmgabel vor die Oeffnung einer flaschenförmigen Resonanzröhre bringt, deren Haupteigenton mit dem Grundton der Gabel übereinstimmt. Der Grundton wird dann allein verstärkt, weil die Obertöne von Gabel und Röhre sehr weit aus einander liegen. Wir. haben hier wieder vollkommen den Eindruck wie von der rein pendelartigen Schwingung der weiten gedackten Pfeifen. Auf welche Weise überhaupt ein Ton oder ein Klang von einem beliebig geformten Instrumente von genau gleich hohen und starken Partialtönen hervorgerufen ist, immer macht er auf unsere Gehörsnerven genau denselben Eindruck, wenn wir von dem unmusikalischen Theil der Klangfarbe abstrahiren. Hemholtz hat durch verschiedene Vorrichtungen den einfachen Ton der Stimmgabeln andauernd zu machen gewusst. Hierdurch gelang es ihm, die meisten Vokale der Sprache, die meisten Lippenpfeifen, die Flöte, die Clarinette und die weicheren Klänge des Horns nachzumachen; für die übrigen Instrumente fehlten ihm die hohen Obertöne, oder sie waren, wenn er sie hatte, nicht kräftig genug.

Bisher war es der Physiologie nicht gelungen, die Art und Weise näher zu bestimmen, wie eine Tonempfindung zu Stande kommt Man begnügte sich einfach damit zu sagen, dass das Ohr die Fähigkeit habe, augenblicklich die Zahl der Schwingungen, die beim Klange entstehen, genau zu zählen — Tonhöhe — und sogar die Schwingungscurve der Luftbewegung genau wahrzunehmen — Klangfarbe, Stärke. — Wie aber das Ohr zu diesen ganz unbegreiflichen Fähigkeiten komme, konnte niemand sagen. Die von Helmholtz gefundene Theorie der Obertöne führt aber zu einer Hypothese, durch die die Möglichkeit der Empfindung des Schalls eingesehen werden kann. Bis zu dieser Möglichkeit erklärt sie alles, steht mit keiner Thatsache im Widerspruch, ist zugleich sehr einfach und zuletzt durch directe Beobachtungen theilweise bestätigt. Die Wahrscheinlichkeit dieser Hypothese dürfte darum an Gewissheit grenzen.

Singen wir in die von ihren Dämpfern befreiten Saiten eines Klaviers, so kommen alle die Saiten zum Mitschwingen, in deren Klange ein Ton enthalten ist, der in unserer Stimme vorhanden war. Hierbei kann allerdings eine Saite von vielen Tönen in Schwingung versetzt werden, aber wir können uns ein Klavier gebaut denken, bei dem die Saiten nur immer bei einem bestimmten Tone mitschwingen können. Würde dann jede Saite mit einem bestimmten Nerven unseres Körpers in Verbindung gebracht, so wüssten wir genau, welche Töne nach Höhe und Stärke in das Klavier hineinschallten. Nun Klaviere haben wir doch nicht etwa in unseren Ohren! könnte ein Ungläubiger ausrufen. Wie sonderbar auch für den ersten Augenblick

diese Sache zu sein scheint, so weist doch die neue Physiologie des Ohres bestimmt nach, dass in der membranösen Scheidewand zwischen Vorhofs- und Paukentreppe in der Schnecke den Klavieren durchaus nicht unähnliche Vorrichtungen existiren, und dass die Saiten dieser Klaviere, Cortische Fasern genannt, durch jeden äusseren Ton zum Mitschwingen gebracht werden können. Die directen Beobachtungen, welche beweisen, dass durch das Mitschwingen von Fasern die Tonempfindung zu Stande kommt, machte Hensen bei einer gewissen Art von Krebsen Bei diesen nemlich befindet sich das Organ des Gehörs, bestehend aus eigenthümlich gebildeten steifen Härchen, an der freien Fläche des Schwanzes. Hensen brachte einen solchen Krebs in dem Wasser eines Glaskastens so an, dass er die Gehörshärchen durch ein Mikroscop beobachten konnte. Das Wasser war mit einem Apparat in Verbindung, der den menschlichen Gehörsknöchelchen genau nachgebildet war, so dass das Wasser gleichsam das Labyrinth des construirten Ohres wurde. Als nun Hensen die Klänge eines Klapphorns durch Trommelfell, Hammer, Amboss und Steigbügel nach dem Wasser leitete, sah er ganz deutlich, dass bei jedem Klange bestimmte Härchen in Vibration versetzt wurden Die Härchen waren also wie Klaviersaiten auf bestimmte Töne abgestimmt. Einen weiteren experimentellen Nachweis für die Richtigkeit der neuen Theorie der Wahrnehmung der Töne können wir bei den höher organisirten Thieren nicht erwarten; denn bei diesen liegen die so leicht zu verletzenden Theile des Labyrinths und der Schnecke tief in den festen Wänden des Felsenbeins verborgen; doch wird es auch dieser neuen experi-

mentellen Nachweise gar nicht bedürfen, da die Sinneswerkzeuge bei allen Thieren trotz aller äusseren Verschiedenheiten durchaus auf denselben Principien beruhen.

Die Grundlage der neuen Theorie der Tonempfindung ist mit dem bisher Besprochenen gegeben; es bleibt uns aber noch übrig, aus ihr einige unmittelbare Folgerungen anzuführen. Wir wollen hier zuerst die Schwebungen oder Stösse im Lichte der neuen Theorie betrachten. Die ältere Akustik sagte, Schwebungen entstehen, wenn von den Schwingungscurven zweier Töne bald Berg auf Berg bald Berg auf Thal zu liegen kommt. Bei Berg auf Berg tritt eine Verstärkung, bei Berg auf Thal eine Schwächung des Tones ein. Macht der erste Ton a der zweite Ton a + b Schwingung in der Secunde, so treffen, wenn am Anfange zwei Berge auf einander liegen, nach je $\frac{a}{b}$ Schwingung des ersten Tones oder je $\frac{a}{b} + 1$ Schwingung des zweiten Tones die Berge wieder auf einander, während in der Mitte Berg auf Thal zu liegen kommt; daher kommen in einer Secunde b Verstärkungen und Schwächungen d h. b Schwebungen zu Stande. So wahr auch das Gesagte bei hinlänglich kleinem b ist, so ist diese Erklärung doch mit den Principien der neuen Theorie im Widerspruch. Die mitschwingenden Theile des Ohres zerlegen wie die Saiten des Klaviers die Resultate von z B. zwei pendelartigen Luftschwingungen zurück in diese Componenten, gleichgültig wie unser Auge die Abweichungen von der Gleichgewichtslage in den bezüglichen Curven beurtheilt. Die richtige Erklärung der Schwebungen ist vielmehr folgende: Liegen zwei Töne so nahe an einander, dass

dieselbe Cortische Faser in Bewegung gesetzt wird, so wird sie, wenn beide Töne sie nach derselben Seite biegen, ausgiebiger von der Gleichgewichtslage abweichen, als wenn der eine Ton sie nach der einen, der andere nach der anderen Seite zu treiben sucht. Je ausgiebiger aber die Schwingung ist, desto kräftiger ist natürlich die entstehende Empfindung. Auf diese Weise kommen also die Schwebungen zu Stande, trotzdem dass das Ohr die resultirende Schwingung in ihre pendelartige Componenten zerlegt. Sind die Töne so weit von einander entfernt, dass dieselbe Cortische Faser von beiden nicht mehr berührt wird, so kann keine Schwebung eintreten. Man sieht übrigens leicht ein, warum hier das Resultat der älteren Theorie mit dem der neuen übereinstimmt.

Eine sehr wichtige und äusserst interessante Frage ist jetzt, was aus den Schwebungen wird, wenn ihre Anzahl wächst. Wir wollen es zu verfolgen suchen. Es war so eben angegeben worden, dass die Anzahl der Schwebungen immer gleich der Differenz der Schwingungszahlen der in Frage kommenden Töne sei; diese Differenz wollen wir nun allmählich wachsen lassen; dies können wir auf zweierlei Weise machen, entweder, indem wir die Differenz der Tonhöhe vergrössern, oder, indem wir mit demselben Abstand der Töne in die höheren Octaven rücken. Ist die Anzahl der Schwebungen noch gering, etwa 4 bis 6 in der Secunde, so folgt ihnen das Ohr leicht; ihr Eindruck kann bei nicht anhaltender Anwendung, namentlich bei lang getragenen Accorden, etwas sehr Feierliches haben; dauern aber diese Schwebungen zu lange an, so machen sie den erbärmlichen Eindruck einer fortdauernd tremulirenden Stimme.

Wird allmählich ihre Anzahl grösser, bis 20 und 40 in der Secunde, so hat das Ohr natürlich nicht mehr Zeit, sie einzeln zu zählen; es hat aber immer noch den Eindruck von Schwebungen, wie ihn die früheren langsamen verursachten. Die Empfindung ist allerdings eine andere geworden; zunächst nemlich empfindet der Mensch das Unheimliche, wie es alles Unklare verursacht; sodann ist auch der directe sinnliche Eindruck wegen der Schnelligkeit der auf einander folgenden Reizungen der Nerven unangenehm; er hat das Knarrende eines fortwährend gesprochenen R. Das scharf Schwirrende haben wir sehr deutlich bei den 33 Schwebungen von h′ c″. Nehmen wir in dieser Gegend der Tonleiter einen ganzen Ton, so bekommen wir immer noch den Eindruck von Schwebungen, obwohl ihre Anzahl über 60 steigt. Der sinnliche Eindruck wird aber weniger unangenehm, weniger schnarrend. Der Grund davon ist einerseits wohl der, dass die Reizungen der Nerven so schnell auf einander folgen, dass sie sich in Zwischenräumen zwischen zwei Eindrücken nicht mehr genügend ausruhen können, um ungeschwächt den neuen Eindruck aufzunehmen. Andererseits scheint die Empfindung auch darum an Unannehmlichkeit zu verlieren, weil die Töne so weit aus einander liegen, dass nur wenige Cortische Fasern in geringer Stärke zum Mitschwingen gebracht werden. Dass der erste Grund nicht der alleinige ist, folgt leicht daraus, dass die 66 Schwebungen des halben Tones h″ c‴ wieder bedeutend unangenehmer werden als die ungefähr gleiche Anzahl in der niederen Octave bei der Tondifferenz einer ganzen Note. Mit diesen 66 Schwebungen haben wir die äusserst mögliche Grenze von hörbaren

Schwebungen noch lange nicht erreicht. Denn wenn wir auch schon wegen der Breite der Tondifferenz die 88 Schwebungen von a' c'' kaum hören können, so giebt z. B. die halbe Tondifferenz e''' f''' noch 88 Schwebungen und h''' c'''' sogar 132 Schwebungen deutlich in der Secunde. Ein Akustiker der alten Schule wird hier, ehe er die leicht anzustellenden Versuche gemacht hat, ungläubig den Kopf schütteln. Wie soll es möglich sein, wird er sagen, so viele Tonstösse in der Secunde als Tonstösse wahrzunehmen! Sie sind ja schon lange so schnell, dass sie sich zu Tönen einigen; man hat sogar für diese Art Töne einen besonderen Namen nemlich Combinationstöne; dieselben kann man ja beliebig oft hören. Diesen Akustikern müssen wir entgegnen, dass das Experiment, wie wir es anstellten, das Factum der 132 hörbaren Schwebungen feststellt. Wenn unter gewissen Umständen ein Combinationston zu hören ist, so muss für ihn eine andere Erklärungsweise gesucht werden. Eine kleine Ueberlegung zeigt, dass mit Voraussetzung der Richtigkeit des bisher Besprochenen aus Schwebungen nie ein neuer Ton entstehen kann. Von h''' und c'''' werden nur Nervenanhänge zum Mitschwingen gebracht, die ungefähr 2000 Schwingungen machen. Durch die 120 eintretenden Schwebungen wird nun nicht etwa die Anzahl der Schwingungen vermehrt, sondern in ungefähr 17 Schwingungen haben wir ein Maximum und ein Minimum der Ausbiegung der betreffenden Faser und damit ein Maximum und ein Minimum der Empfindung. Ja selbst wenn die Faser gleichsam gewaltsam gezwungen würde, noch 120 Schwingungen in der Secunde mehr zu machen, so würden wir doch gewiss noch keinen neuen Ton er-

halten; denn nach Johannes Müller's Untersuchungen giebt ein Nerv, auf welche Weise man ihn auch reizen mag, immer nur die ihm eigenthümliche Empfindung. Es ist also klar, dass durch Schwebungen nie ein neuer Ton entstehen kann.

Da der Mensch das einmal für richtig Gehaltene mit der grössten Zähigkeit festhält, so bin ich überzeugt, dass die älteren Akustiker vielleicht die ganze neue Theorie bei Seite legen würden, wenn diese ihnen nicht für die Combinationstöne, deren Erklärung bisher doch so elegant war, eine genügende Ableitung finden könnte. Diese Ableitung soll ihnen aber jetzt gegeben werden, damit ihnen kein Grund zum Zweifeln übrig bleibt. Vorweg ist aber gleich eine neue Entdeckung hervorzuheben, zu der die neue Theorie geführt hat, dass es nemlich zwei Arten von Combinationstönen giebt. Erstens die schon um 1740 von unserem Landsmann Sorge — der Italiener Tartini, nach dem diese Töne oft genannt werden, hat sie nicht entdeckt, sondern nur näher beschrieben — entdeckten, deren Schwingungszahl immer gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Haupttöne ist, — sie nennt Helmholtz Differenztöne — und zweitens solche, deren Schwingungszahl gleich ihrer Summe ist — sie nennt ihr Entdecker Helmholtz Summationstöne —, dieselben sind aber selten in bedeutender Stärke vorhanden, und fast immer nur mit Hilfe der Resonatoren zu hören. Es braucht wohl kaum bemerkt zu werden, — was man bisher noch nicht beobachtet hatte — dass beide Arten von Combinationstönen auch bei den Obertönen vorkommen können; denn wenn wir im allgemeinen von Tönen sprechen, so ist es gleichgültig, ob die Töne zufällig

Obertöne sind oder nicht; es wird auch nicht wunderbar sein, wenn wir sagen, dass die Combinationstöne, wenn sie in bedeutender Stärke vorhanden sind, sich wie jeder andere Ton zu den übrigen Tönen verhalten, dass sie also mit ihnen von neuem wieder Combinationstöne bilden können. Nachdem wir diese Entdeckungen vorausgeschickt haben, wollen wir die Erklärung der Combinationstöne geben. In der ganzen bisherigen Abhandlung war vorausgesetzt, dass die durch den tönenden Körper verursachte Dichtigkeitsveränderung der schwingenden Luft oder eines anderen elastischen Mediums im Verhältniss zur Dichtigkeit des ganzen Mediums unendlich klein sei. Diese Annahme ist im allgemeinen sehr wohl zu machen, aber es finden sich doch Fälle vor, wo die Dichtigkeitsveränderungen nicht mehr unendlich klein sind; alsdann entstehen die Töne, die wir so eben beschrieben haben. Das elastische Medium, in dem die Combinationstöne entstehen können, kann nicht die unbegrenzte Luft sein; denn eine Bewegung ihrer Theile durch die Töne wird gegen die ganze Luftmasse immer unendlich klein sein; das Medium kann aber wohl eine abgegrenzte Luftmasse sein. Eine abgegrenzte Luftmasse wird nun namentlich bei der Physharmonika und in noch erhöhtem Maasse bei der Sirene von Cagniard la Tour in Bewegung gesetzt, wenn man bei der Sirene die über dem Windkasten sich drehende Scheibe mit zwei Reihen von Löchern von verschiedener Anzahl versieht und so zwei verschiedene Töne zugleich erzeugen lässt. Wir wollen uns die Sache bei der Sirene näher ansehen. Rotirt die Scheibe, so stürzt aus der einen Löcherreihe sehr viel Wind heraus, so dass eine beträchtliche Druckverminderung

im Kasten eintritt; es sammelt sich nun wieder die Luft so lange, bis sich die andere Löcherreihe öffnet; wir haben dann dasselbe wie früher. Da aber die eine Löcherreihe mehr Oeffnungen hat als die andere, so ist die Verminderung in der Dichtigkeit der Luft im Kasten nicht von beiden Reihen gleich; es geräth darum die Luft im Kasten selbst in sehr heftige Schwingung, so dass die Luft nicht mehr mit derselben Geschwindigkeit aus den Löchern heraustritt; daher entstehen hier die Combinationstöne namentlich auch die sonst so schwer zu hörenden Summationstöne fast eben so stark wie die Grundtöne; sie sind darum hier leicht zu hören. Da hier die Combinationstöne entfernt vom Ohre entstehen, so können sie in der äusseren Luftmasse, die natürlich den einmal erzeugten Combinationston wie jeden anderen Ton fortpflanzt, Membrane, deren Eigentöne dieselbe Tonhöhe als sie selbst haben, in Bewegung setzen.

Geben zwei getrennte Instrumente sehr starke Töne, so wird dieselbe begrenzte Luftmasse nicht in heftige Bewegung gesetzt; es können also Combinationstöne nicht entstehen, welche Membrane zum Mitschwingen bringen. Das Experiment bestätige dies. Wir hören aber auch hier oft Combinationstöne. Das Medium, das von beiden Tönen in nicht ganz unendlich kleine Bewegung gesetzt wird, ist jetzt Trommelfell und Gehörsknöchelchen; die so erzeugten Combinationstöne bestehen also nicht in der äusseren Luft sondern nur im Ohre; für die mitschwingenden Fasern in der Scheidewand zwischen Vorhofs- und Paukentreppe aber ist es eben so gut, als ob der Ton schon in der äusseren Luft erzeugt wäre; die durch ihn hervorgerufene

Tonempfindung ist also durchaus nicht den subjectiven Tonempfindungen zuzuzählen. Wegen ihrer Objectivität können sie also auch wie jeder andere Ton Schwebungen bilden. Auf diese Weise also haben wir das Zustandekommen der Combinationstöne ganz unabhängig von den Schwebungen erklärt.

Wir kommen jetzt zuletzt zur Beantwortung einer Frage, über die wahrscheinlich schon die Aegypter nachgedacht haben, nemlich: Was haben die Consonanzen mit den ersten Zahlen der Zahlenreihe zu thun? Die Antwort ist eine so einfache Folge der neuen Theorie der Tonempfindungen, dass wir sie in kurzen Worten abmachen können. Wir sahen, dass eine Tonempfindung mehr oder weniger unangenehm für unser Gefühl ist und sein muss, wenn in derselben Schwebungen vorkommen; auch war gezeigt worden, wie der Grad des Unangenehmen in zusammengesetzter Weise von der Schnelle der Schwebungen und von der Höhe der Töne abhängt. Werden zwei Klänge auf irgend eine Weise angegeben, und die dadurch entstehenden Töne aller Art genau nach ihrer Tonhöhe und Stärke bestimmt, so findet man, dass das Zusammenbestehen der Klänge eine um so angenehmere Empfindung in uns hervorruft, je weniger unangenehm die entstehenden Schwebungen sind. Es giebt nun im allgemeinen gar keine oder nur Schwebungen von geringer Rauhigkeit, wenn die Schwingungszahlen der Grundtöne zweier Klänge im Verhältniss der ersten ganzen Zahlen stehen — consonante Klänge —; stehen aber die Grundtöne nicht in dem bezeichneten Verhältniss, so giebt es im allgemeinen rauhe, knarrende Schwebungen — dissonante Klänge —. Als Beweis

für die Richtigkeit dieser Behauptung muss man jeden Fall einzeln durchführen; da aber die Durchführung sehr leicht ist, so begnügen wir uns damit, auf eine ähnliche zu verweisen, die sogleich gegeben werden soll. Wenn wir bedenken, was wir über die Rauhigkeit der verschiedenen Schwebungen und über den Mangel und die Anwesenheit der Obertöne bei den einzelnen Instrumenten gesagt haben, so wird uns erklärlich sein, dass dasselbe Zahlenverhältniss der Schwingungszahlen zweier Klänge je nach der Anwesenheit der Obertöne d. h. je nach den in Frage kommenden Instrumenten und je nach der Gegend der Scala, in der die Klänge angegeben werden, durchaus einen verschiedenen Eindruck auf uns machen muss; auch ist klar, dass der Uebergang von Consonanz zur Dissonanz ein durchaus allmählicher sein muss. Trotzdem, dass diese letzten Behauptungen mit der gewöhnlichen musikalischen Ansicht durchaus im Widerspruch stehen, so enthalte ich mich doch jeder weiteren Auseinandersetzung; das Gesagte ist eben nur eine ganz einfache Folgerung der neuen Theorie. Wir wollen aber wenigstens noch ein Beispiel dafür durchführen, dass der Grad der Consonanz zweier Töne durchaus nur von den Schwebungen der entstehenden Theiltöne abhängt.

Ich gebe auf der Clarinette, bei der die geraden Obertöne fehlten, die Note cis' = 275 und auf der Physharmonika, in deren Klang alle Obertöne vorhanden sind, die Note é = 330 an und suche alle möglicher Weise entstehenden Töne, zuerst die Obertöne der Clarinette 275, 0, 825, 0, 1375, 0, 1925, . . . dann die der Physharmonika 330, 660, 990, 1320, 1650, 1980, 2310 . . . Sehen wir

zuerst auf die Schwebungen dieser Töne, so finden wir, dass die Grundtöne 275 und 330 55 Schwebungen in der Secunde geben. Dieselben werden bei ihrer Zahl und Gegend der Scala den Zusammenklang einigermassen stören; eine volle Consonanz bilden darum diese Töne nicht; ihr Zusammenklang kann nur als unvollkommene Consonanz angesehen werden. Wir gehen zu den Obertönen. Man bemerkt, dass der fünfte Oberton der Clarinette 1372 mit dem vierten Oberton der Physharmonika 1320 55 Schwebungen geben; dieselben sind viel rauher als die 55 Schwebungen zwischen 330 und 275, weil sie sich in viel höherer Gegend der Tonleiter befinden; sie sind nur darum noch erträglich, weil die sie zu Stande bringenden Töne an sich schon schwach sind. Dasselbe ist von den Schwebungen zwischen den Tönen 1980 und 1925 in erhöhtem Masse zu sagen.

Jetzt wollen wir gleich zur Vergleichung auf der Physharmonika die tiefere und auf der Clarinette die höhere Note angeben; wir bekommen die Töne auf der Physharmonika 275, 550, 825, 1100, 1375, 1650, 1925, . . . dann die auf der Clarinette 330, 0, 990, 0, 1650, 0, 2310, . . . Wir sehen, dass die früher störenden Schwebungen mit Ausnahme der der Grundtöne, jetzt weggefallen und dafür keine neuen eingetreten sind; ausserdem fallen jetzt der sechste Oberton der Physharmonika und der fünfte der Clarinette zusammen; derselbe ist also verstärkt zu hören; der Zusammenklang bekommt hierdurch eine gewisse Abgrenzung und erregt darum unsere Empfindung angenehmer. Wenn wir also bis jetzt nur die Obertöne der beiden Noten berücksichtigen, so ist die eine kleine Terz, eine bedeutend

schlechtere unvollkommene Consonanz als die andere. Wir wollen nun sehen, ob dieses Resultat durch die Combinationstöne geändert wird.

Die Differenztöne sind, wenn die Clarinette cis' und die Physharmonika e' angiebt: 330 — 275 = 55; 660 — 275 = 385; 990 — 275 = 715; 1320 — 275 = 1045; . . . — 330 + 825 = 495; — 660 + 825 = 165; 1320 — 825 = 495 . . . . . wenn die Klarinette e' und die Physharmonika cis' angiebt: 330 — 275 = 55; 990 — 275 = 715; 1650 — 275 = 1375; . . . — 330 + 550 = 220; 990 — 550 = 440; 1650 — 550 = 1100; . . . — 330 + 825 = 495; 990 — 825 = 165; 1650 — 825 = 825 . . . . . .

Durch diese Töne wird das bisherige Resultat im Wohlklange der beiden Terzen nicht geändert; denn im ersten Fall giebt der Ton 385 mit 330, 715 mit 660 und 1045 mit 990 u. s. w., wenn sie noch vorhanden sind, ungefähr ebenso rauhe Schwebungen als der Ton 220 mit 275 und 495 mit 550, wenn sie noch vorhanden sind.

Da durchaus nichts hindert, dass die Obertöne eines Klanges auch unter sich Combinationstöne bilden können, so kommen alle die als nicht vorhanden bezeichneten Obertöne der Clarinette äusserst schwach als Combinationstöne vor; bei ihrer Schwäche können sie aber so gut wie gar keinen Einfluss auf den Zusammenklang ausüben.

Die Differenztöne zwischen den Obertönen können wieder mit den Obertönen Differenztöne bilden; in unserem Falle sind sie wohl kaum in irgend merklicher Stärke vor-

handen; die stärksten 330 — 55 = 275 und 275 — 55 = 220 ändern am bisherigen Resultate nichts.

Ist der Summationston 330 + 275 = 605 vorhanden, so macht er beide Terzen rauher; die disharmonischere unbedeutend mehr als die andere, denn zwischen 605 und 660 ist der Abstand der Noten ein wenig enger als zwischen 550 und 605. Die übrigen möglicher Weise entstehenden Töne sind jedenfalls einflusslos.

Das Gesammtresultat dieser Betrachtung ist also, dass die kleine Terz, in der die Clarinette die niedere Note und die Physharmonika die höhere Note angiebt, eine sehr viel schlechtere unvollkommene Consonanz ist, als im entgegengesetzten Falle. Das Ohr jedes geübteren Musikers wird die Resultate dieser rein theoretischen Untersuchungen vollkommen bestätigen.

Mit der Erklärung der Consonanz und Dissonanz durch die neue Theorie der Tonempfindungen glauben wir unsere Abhandlung abschliessen zu müssen. Wie man auf den gegebenen Elementen die Theorie der Musik begründen kann, wollen wir den Musikern überlassen.

Der Verfasser, geboren zu Crossen a. O den 7. Februar 1844, evangelischer Confession, absolvirte seinen Gymnasial-Cursus auf dem Gymnasium bei Züllichau und bezog hierauf um Michaelis 1864 die Universität zu Berlin, auf der er während der sechs Semester seines philosophischen Studiums den Unterricht folgender Herren genoss: Arndt, Bona-Meyer, du Bois-Raymond, Dove, Kummer, Magnus, Michelet, Paalzow, Poggendorf, Quincke, Trendelenburg, Weierstrass. Er war Mitglied des pädagogischen und mathematischen Seminars in Berlin. Das Examen pro facultate docendi bestand er daselbst im Herbst 1869.